YOUSUB LEE

# Partikel im Blick

**Was passiert eigentlich genau bei Laserauftragsschweißen und 3D-Druck? Zwei Simulationen helfen, die physikalischen Vorgänge im Werkstoff zu verstehen. Damit verbessern sie Reproduzierbarkeit und Oberflächenqualität bei beiden Verfahren.**

Insbesondere bei der Verwendung teurer metallischer Werkstoffe ist die additive Laserfertigung (LAM, Laser Additive Manufacturing) das optimale Verfahren für die endformnahe Fertigung komplexer 3D-Bauteile aus CAD-Daten. Im Gegensatz dazu bedürfen mit konventionellen Methoden produzierte Teile einer Endbearbeitung mit Zerspanungswerkzeugen. Trotz dieses einzigartigen Vorteils wird die breite Verwendung der LAM durch die nach wie vor auftretenden Mängel der additiv gefertigten Teile (wie zum Beispiel Porosität oder Balling-Effekt) erschwert, die dann auch oft eine Nachbearbeitung erforderlich machen.

Weiterhin behindern die schwierige Vorherbestimmung der Maßtoleranzen sowie die inhomogenen Werkstoffeigenschaften der gefertigten Teile die umfangreiche industrielle Nutzung der LAM. Das Bewältigen dieser Problematiken setzt ein quantitatives Verständnis der Beziehung zwischen Prozessparametern, Wärmeübertragung, Metallschmelze, Schmelzbadform und Erstarrungsmikrostruktur voraus.

» **Mit den Simulationen verstehen wir endlich alle relevanten Prozessparameter.**

Die experimentelle Beobachtung der physikalischen Phänomene erweist sich jedoch als sehr schwierig, da die LAM-Schmelzbäder inhärent örtlich begrenzt und nicht dauerhaft sind. Außerdem können In-situ-Messungen thermischer und flüssiger Größen mittels optischer und Infrarotkameras üblicherweise nur auf der Oberfläche des Schmelzbades vorgenommen werden. Der Modellrechnungsansatz ist jedoch jederzeit und an jedem Ort in der Lage, 3D-Daten hinsichtlich Temperaturverteilungen, Strömungsgeschwindigkeiten, Schmelzbadform und Erstarrungsbedingungen (Temperaturgradient G und Erstarrungsgeschwindigkeit R) zu liefern.

Leider weisen viele der bisher durchgeführten numerischen Simulationen mit Fokus auf Laser- oder Schmelzschweißprozessen keine detaillierten charakteristischen Eigenschaften des LAM-Prozesses aus.

## Im Schmelzbad

Das Laserauftragsschweißen (LMD, Laser Metal Deposition) wie auch das pulverbettbasierte Laserschmelzen (LMF, Laser Metal Fusion) sind Prozesse, die Pulverpartikel und einen Laserstrahl zur Bildung einer Aufbauschicht verwenden. Das Zusammenwirken zwischen Laser, Pulver und Substrat muss in die LAM-Simulationen einfließen. Bei LMD-Systemen wirken die Pulverpartikel auf ihrem Weg ins Schmelzbad mit dem Laserstrahl zusammen. Das Zusammenwirken schwächt die Stärke des Laserstrahls durch Reflexion, Absorption und Strahlung. Auch die Auffangeffizienz (= Flächenverhältnis Schmelzbad zu Pulverstrahl) sollte bei einer LMD-Simulation berücksichtigt werden, da die in das Schmelzbad eintauchenden Pulverpartikel lediglich zur Bildung der Aufbauschicht verwendet werden.

Unverbundene Wölbungen im Schmelzbad beim 3D-Druck.<br />Abbildung: Yousub Lee

In LMF-Systemen hängt der Absorptionsgrad des Laserstrahls von der Beschaffenheit der Partikel im Schmelzbad ab. Die Schmelzbadgeometrie wie auch der Temperaturgradient und die Flüssigkeitsströmung werden durch die lokale Anordnung der Partikel erheblich beeinflusst. Deshalb sollten bei LMF-Simulationen die Auswirkungen der Schmelzbadbeschaffenheit auf die thermischen Bedingungen, die Oberflächenqualität und die Mikrostruktur untersucht werden.

Das Ziel unserer Simulation war die Bereitstellung eines quantitativen Verständnisses der Beziehung zwischen Prozessparametern, Temperaturbedingungen, Flüssigkeitsströmung, Schmelzbadform und der sich daraus ergebenden Mikrostruktur. Es wurden LMD-Simulationen durchgeführt, um den Einfluss der Flüssigkeitskonvektion auf die Geometrie des Schmelzbades, die Erstarrungsmikrostruktur und das Ausmaß des Aufbaus zu demonstrieren.

Für die LMF-Simulationen wurden mesoskalige Modelle hergestellt. Diese dienten zur Demonstration der Auswirkungen der Pulverpartikel und Prozessparameter (das heißt Laserleistung und Scangeschwindigkeit) auf die Eigenschaften des Schmelzbades insbesondere das Temperaturprofil, die Schmelzbad-Flüssigkeitsströmung, das Schmelzbad-Oberflächenprofil und die entsprechenden Oberflächenmängel. Danach wurden die aus der Simulation resultierenden Erstarrungsbedingungen herangezogen, um die Erstarrungsmikrostruktur quantitativ zu bewerten.

## Abkühlung bei LMD

Zur Erforschung der Auswirkungen der Flüssigkeitskonvektion auf die Schmelzbadausbildung bei einspurigen und einschichtigen IN 718-Auftragschichten griffen wir beim LMD mit Pulvereinblasen auf eine transiente 3D-Lasersimulation zurück, welche die Auswirkungen der Wärmeübertragung, der Flüssigkeitsströmung, der Pulverpartikelzufuhr und der Wechselwirkung zwischen Laser, Pulver und Substrat berücksichtigte. Das Modell demonstrierte, dass das am tiefsten penetrierte Schmelzbad in der dem hinteren Teil des Schmelzbades angrenzenden Zwischenregion jedoch hinter dem Fokusfleck gebildet wurde. Dieses vergrößerte Schmelzbad entwickelt sich aufgrund des Zusammenstoßens zweier entgegengesetzter Flüssigkeitsströmungen, hervorgerufen durch den Übergang des Oberflächenspannungsgradienten von positiv zu negativ entlang der X-Achse.

Die vorhergesagten Schmelzbadgeometrien waren vergleichbar mit der experimentellen Messung der Breite, Höhe und Penetrationstiefe bei drei verschiedenen Laserleistungen, nämlich 350, 450 und 550 Watt. Der Temperaturgradient G und die Erstarrungsgeschwindigkeit R wurden entlang der Verschmelzungsgrenze des Schmelzbades im Modell ermittelt, um die Auswirkungen der Flüssigkeitskonvektion auf die Erstarrungsmikrostruktur festzustellen. Die Abkühlgeschwindigkeit (G x R) wurde errechnet und die Größe des Primärdendritenarmabstandes (PDAS, Primary Dendrite Arm Spacing) entlang der Verschmelzungsgrenze unter Verwendung des theoretischen Modells von Kurz und Fisher und trivedi vorausberechnet.

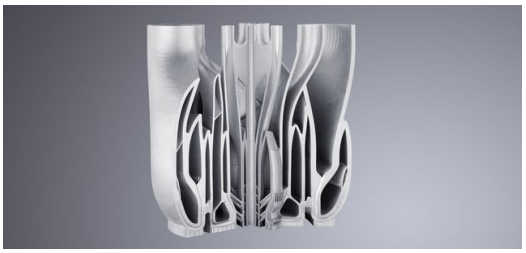
**Bei LMD vermischen sich Heißschmelze und Kaltschmelze. Und dann passieren spannende Dinge.**

Die Vorausberechnung zeigte, dass die Abkühlgeschwindigkeitswerte in der Zwischenregion nicht nur von größerer hin zu geringerer Tiefe abnehmen, sondern auch vom Zentrum hin zu den Seitenrändern des Schmelzbades. Mit anderen Worten: Es ergab sich das allgemeine Muster, dass die Abkühlgeschwindigkeit mit zunehmender seitlicher Breite und Tiefe zunimmt. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass das Vermischen der beiden entgegengesetzten Strömungen in der Zwischenregion zum Vermischen von Heißschmelze (sich zurückbewegend vom vorderen Teil des Schmelzbades) und Kaltschmelze (sich vorwärtsbewegend vom hinteren Teil des Schmelzbades) führt.

Folglich verringert sich die Abkühlgeschwindigkeit in derjenigen Region, die gut mit der vorausberechneten Größe des PDAS übereinstimmt. Gleichermaßen steigt die vorausberechnete Größe des PDAS nahe des Schmelzbadseitenrandes in der Region an. Die vorausberechneten PDAS-Werte stimmten gut mit dem gemessenen Durchschnittswert von 9,9 Mikrometern überein.

### Wölbung in Pilzform

Das oben beschriebene 3D-Modell wurde zu einem LMD-Prozess mit mehreren Schichten auf einer Spur erweitert, um den Einfluss der Flüssigkeitskonvektion auf die Ausbildung des Schmelzbades und das Ausmaß der Auftragsbildung zu erforschen. Anders als beim einfachen Auftrag auf einem flachen Substrat werden der Laserstrahl und die Pulverpartikel während des Schichtenaufbaus auf eine konvexe, freie Oberfläche projiziert. Aufgrund der auftretenden Marangoni-Scherspannung und der Partikelzufuhr kommt es in einem Schmelzbad mit konvexer Oberfläche zu Flüssigkeitszirkulation. Die Simulation ergab, dass sich die Form des Schmelzbadbodens mit zunehmender Höhe des Auftrags kontinuierlich von flach hin zu konvex verändert.



Simulationen helfen, die physikalischen Vorgänge bei Laserauftragschweißen und 3D-Druck zu verstehen und verbessern dadurch die Oberflächenqualität.<br />Bild: Yousub Lee

Die Analyse des Schmelzbadbodens ergab, dass die konvexe Form des Schmelzbadbodens teilweise auf die konvexe, freie Oberfläche der zuvor aufgebauten Schicht zurückzuführen ist. Weiterhin ergab die Untersuchung der dimensionslosen Kennzahlen (Péclet, Prandtl und Marangoni) und der Flüssigkeitsströmungsmuster, dass die marangonibedingte Flüssigkeitspenetration in die zuvor erzeugte Schicht hinein am äußeren Rand zunimmt und so die konvexe Form des Schmelzbadbodens zusätzlich begünstigt. Basierend auf der obigen Analyse wurde eine zusätzliche Studie mit drei unterschiedlichen Flüssigkeitsströmungsmustern, hervorgerufen durch verschiedene Arten der Oberflächenspannungsgradienten (positiv, negativ und gemischt), durchgeführt, um deren Auswirkungen auf die Geometrie des Endaufbaus festzustellen.

**Je dichter und feiner die Partikel bei LMF, desto weniger Wölbungsfehler entstehen.**

Es wurde eine ähnliche pilzförmige Wölbung zu Beginn des Auftragaufbaus von Material mit positivem oder negativem

Oberflächenspannungsgradienten beobachtet. Es zeigte sich jedoch bei Material mit gemischtem Oberflächenspannungsgradienten, dass die seitliche Breite der Wölbung im Vergleich zu der Wölbungsbreite bei Material mit negativem Gradienten um ungefähr 56 Prozent verringert war. Die Flüssigkeitsströmungsmuster-Analyse zeigte auf, dass die Kollision zweier entgegengesetzter, durch gemischte Gradienten hervorgerufener Strömungen eine Wirkung hinsichtlich der Verringerung des Wölbungseffektes auf die Auftragseitenwände hat. Deshalb kann die Beeinflussung des Oberflächenspannungsgradienten eine Alternative zur Verbesserung der Formgenauigkeit und Oberflächenendqualität der Auftragseitenwand darstellen.

## Flüssigkeitsströmung im Pulverbett

Bei LMD kann die Zuführung einzelner Partikel in Annäherung durch aggregierten Massenstrom in das Schmelzbad ermittelt werden, da der Durchmesser des Laserstrahls ungefähr zwei Millimeter beträgt, sodass Hunderte von Pulverpartikeln geschmolzen werden. Im Gegensatz zum LMD-Verfahren ist bei LMF der Quotient des Laserstrahldurchmessers (100 Mikrometer) zum Partikeldurchmesser (20 bis 40 Mikrometer) klein. Es ist nur möglich, eine begrenzte Anzahl an Pulverpartikeln zu einem bestimmten Zeitpunkt zu schmelzen. Für eine bessere Simulationsgenauigkeit wird daher eine höhere Auflösung der einzelnen Pulverpartikel benötigt.

LMF: Der Laserstrahl trifft die oberste Lage im Pulverbett. Wenn er sich nun nach rechts bewegt, verteilt sich die Temperatur im Schmelzbad so, dass kleine Pulverinseln entstehen. Die Wölbungen machen die Oberfläche „hügelig“. Eine Simulation liefert Parameter, um das Problem zu lösen.<br />Bild: Yousub Lee

Für das LMF-Verfahren wurde ein rechnergestütztes Rahmenwerk mit mesoskaliger Auflösung entwickelt. Zunächst wurde unter Verwendung eines Discrete-Element-Method-Modells (DEM-Modell) die Anordnung des Schmelzbades berechnet. Das DEM-Modell betrachtet jedes einzelne Partikel als ein eigenes Element, sodass das Modell in der Lage ist, die physikalischen Wechselwirkungen zwischen Partikeln und Wand zu berücksichtigen. Danach werden die berechneten Informationen zur Pulveranordnung (das heißt die Lagen und Radien der einzelnen Partikel) als Ausgangsgeometrie in ein transientes 3D-Wärmeübertragungs- und Flüssigkeitsströmungsmodell exportiert.

Das 3D-Transport-Schmelzbadmodell erfasst die Wechselwirkungen zwischen Laserstrahl und Pulverpartikel, insbesondere die freie Oberflächenevolution, die Oberflächenspannung und die Verdampfung. Folglich wurden mit dem 3D-Modell die Auswirkungen der Partikelgrößenverteilung, der Pulveranordnungsdichte, der prozessbestimmenden Parameter auf die Raupengeometrie, das Auftreten von Wölbung und die Erstarrungsmikrostruktur quantitativ untersucht.

## Erstarrungsmorphologie bei LMF

Die Ergebnisse der Simulation zeigten, dass die Partikelverteilung mit einem höheren Anteil an Feinpartikeln eine glattere Kontur des Schmelzbades erzeugten. Weiterhin wurde festgestellt, dass eine höhere Scangeschwindigkeit und eine geringere Laserleistung die Wölbungswahrscheinlichkeit erhöhten. Die Bildung von Wölbungsfehlern hatte ihren Ursprung in einem Hohlkegel im Zentrum des Schmelzbades.

Mit zunehmendem Anwachsen dieses Hohlkegels zerfällt das Schmelzbad durch die Rayleigh-Instabilität in separate Inseln. Aufgrund der vermehrten Massenfüllung eines jeglichen neuen Hohlkegels sollte eine höhere Packungsdichte in der Lage sein, die Bildung von Hohlkegeln zu verringern. Mit anderen Worten: Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Wölbungseffekten kann durch eine erhöhte Anordnungsdichte des Pulvers verringert werden.

Weiterhin wurden die aus der Simulation gewonnenen Erstarrungsbedingungen (G und R) zur Bewertung der Erstarrungsmikrostruktur herangezogen. Die prognostizierte Morphologie erwies sich als überwiegend säulenartig und der PDAS-Wert wurde auf zwischen 1,32 und 1,87 Mikrometer liegend geschätzt. Die berechnete Erstarrungsmikrostruktur stimmte mit der experimentell beobachteten Morphologie und Größe überein.

## Die Grundlage für Optimierung

Aufgrund des hohen Rechenaufwands sind die oben verwendeten 3D-transienten Transportsimulationen in ihrer Verwendung auf einen einfachen Durchgang oder einfache Spuren begrenzt. Dennoch konnten die Modelle wesentliche Eigenschaften des LMD- und des LMF-Verfahrens basierend auf Berechnungen der Wärmeübertragung, der Flüssigkeitsströmung, der freien Oberfläche des Schmelzbades und der Erstarrungsmikrostruktur bei LAM wirksam erfassen.

Diese quantitativen physikalischen Erkenntnisse aus den Simulationen sollten es ermöglichen, die Verstärkung oder Verringerung örtlich begrenzter Mikrostrukturen und inhomogener Werkstoffeigenschaften bei der Fertigung von LAM-Bauteilen über programmierte Prozessparameter zu steuern. Davon gehen wir auf Grundlage unserer Arbeit aus.

**YOUSUB LEE**

FORSCHT AM OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY IN TENNESSEE, USA. ER ERHIELT SEINEN DOKTORGRAD AN DER OHIO STATE UNIVERSITY UNTER PROF. DAVE FARSON UND WEI ZHANG. SEIN DOKTORANDENPROJEKT WURDE UNTERSTÜTZT VON ROLLS ROYCE (DURCH DIE NATIONAL SCIENCE FOUNDATION-INDUSTRY), VOM UNIVERSITY COOPERATIVE RESEARCH CENTER UND VOM U.S. OFFICE OF NAVAL RESEARCH.